Vol.13, No.1, Spring 2024, pp.23-46 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2022.76374.1216 Open access

Investigating Flood Risk using SWAT and SIMHYD Models in Karganrud Drainage Basin, Talesh, Iran

Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam[a*], Kosar Loghmannia[b], Sadra Karimzadeh[c], Abdollah Behboodi[d]

[a] *Professor in Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran*
[b] *MSC in Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran*
[c] *Assistant Professor in Remote Sensing, University of Tabriz, Tabriz, Iran*
[d] *PhD in Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran*

Received: 23 April 2022 ***Revised: 26 May 2022*** ***Accepted: 14 June 2022***

Abstract

It is now easier to simulate catchments and take management measures to reduce flood damage with the development and expansion of hydrological tools. the SWAT model was used as a semi-distributive model and the SIMHYD model was used as an integrated model to estimate the runoff of the Karganrud Talesh catchment. For this purpose, observational data in the period 2006 to 2018 related to Talesh, Astara, Bandar Anzali synoptic stations and Hashtpar hydrometric station were obtained. In modeling by SWAT model, the coefficients N2 and R2 as the objective functions in the monthly flow calibration stage were 0.61 and 0.62, respectively, and in the validation stage were 0.67 and 0.70, respectively, indicating acceptable results in runoff peak simulation and the floods formed in this basin. Acceptable results were also obtained in the calibration and validation of the SIMHYD model. The coefficients N2 and R2 in the calibration stage were 0.710 and 0.8511, respectively, and in the validation stage were 0.625 and 0.9496, respectively. However, due to its semi-distributive nature, the SWAT model has a high accuracy in runoff simulation compared to the SIMHYD model, and the outputs obtained from both models showed this superiority in flood assessment and estimation, since this model simulates runoff well in the daily time period, while the SIMHYD model has satisfactory results in this basin by increasing the quality of data in the monthly time period.

Keywords: Runoff Simulation, SWAT, SIMHYD, Flood, Karganrud River

---

* .Corresponding author: M. H. Rezaei Moghaddam Email: Rezmogh@tabrizu.ac.ir Tel: +989144142190

How to cite this Article: Rezaei Moghaddam, M.H., Loghmannia, K., Karimzadeh, S., & Behboodi, A. (2022). Investigating flood risk through SWAT and SIMHYD models in Karganrud Drainage Basin, Talesh, Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(1),23-46

DOI: 10.22067/geoeh.2022.76374.1216

Geography and Environmental Hazards
Volume 13, Issue 1 - Number 49, Spring 2024
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76374.1216
جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال سیزدهم، شمارۀ چهل و نهم، بهار ۱۴۰۳، صص ۴۶-۲۳

مقاله پژوهشی

بررسی مخاطره سیلاب از طریق مدل‌های SWAT و SIMHYD در حوضه آبریز کَرگانرود تالش

محمدحسین رضائی‌مقدم[۱]– استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

کوثر لقمان‌نیا – کارشناس ارشد ژئومورفولوژی گرایش آمایش محیط، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

صدرا کریم‌زاده – استادیار گروه سنجش‌ازدور، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

عبدالله بهبودی – دکترای ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۵ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۴/۲۴

چکیده

امروزه با پیشرفت و گسترش ابزارهای هیدرولوژیکی و صرفه‌جویی در زمان، هزینه و در شرایط بحرانی به‌منظور اقدامات مدیریتی برای کاهش خسارت‌های ناشی از سیل، استفاده از چنین ابزارهایی باعث سهولت در امر شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز شده است. در پژوهش حاضر از مدل SWAT به‌عنوان یک مدل نیمه‌توزیعی و از مدل SIMHYD به‌عنوان یک مدل یکپارچه جهت برآورد رواناب حوضه آبریز کَرگانرود تالش استفاده شده است. بدین منظور از داده‌های مشاهداتی در محدوده زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸ مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک تالش، آستارا، بندرانزلی و ایستگاه هیدرومتری هشتپر بهره گرفته شده است. در مدل‌سازی توسط مدل SWAT ضرایب N2 و R^2 به‌عنوان تابع هدف در مرحله واسنجی دبی ماهانه به ترتیب ۰/۶۱ و ۰/۶۲ و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۷۰ به دست آمد که نشان‌دهندۀ نتایج قابل قبولی در شبیه‌سازی پیک رواناب و سیل ایجاد شده در این حوضه داشته است. در واسنجی و

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۴۴۱۴۲۱۹۰ Email: Rezmogh@tabrizu.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

رضائی مقدم، محمدحسین؛ لقمان نیا، کوثر؛ کریم‌زاده، صدرا؛ بهبودی، عبدالله؛ ۱۴۰۳. بررسی مخاطره سیلاب از طریق مدل‌های SWAT و SIMHYD در حوضه آبریز کَرگانرود تالش. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۳(۱). صص ۴۶-۲۳
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76374.1216

اعتبارسنجی مدل SIMHYD نیز نتایج قابل قبولی به دست آمد. به‌گونه‌ای که ضرایب N2 و R^2 در مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۷۱۰ و ۰/۸۵۱۱ و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/٦٢٥ و ۰/۹٤۹٦ حاصل شد. مدل SWAT به دلیل ماهیت نیمه‌توزیعی خود از دقت بالاتری در شبیه‌سازی سیلاب حوضه موردمطالعه نسبت به مدل SIMHYD برخوردار است؛ زیرا این مدل در بازه زمانی روزانه نیز به‌خوبی پیک رواناب را شبیه‌سازی می‌کند، درصورتی‌که مدل SIMHYD با افزایش کیفیت داده‌ها در بازه زمانی ماهانه نتایج رضایت بخشی در این حوضه دارد.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی رواناب، مدل SWAT، مدل SIMHYD، سیل، حوضه کرگانرود تالش.

۱- مقدمه

برای مدیریت بهتر، اطلاع از بیلان آبی حوضه‌های آبریز ضروری است و به دلیل وقت‌گیر و پرهزینه بودن اندازه‌گیری اجزای بیلان آب، مدل‌سازی پدیده‌های هیدرولوژی در حوضه‌آبریز می‌تواند راه‌حل بهینه‌ای برای آن‌ها باشد (**زارع کاریزی و طالبی، ۱۳۹۵**)؛ بنابراین آگاهی دقیق از رفتار هیدرولوژیک حوضه‌های آبریز می‌تواند به شبیه‌سازی بهتر این محیط به‌منظور کنترل مؤلفه‌های اصلی بیلان آب کمک شایانی نماید (مؤذن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵). در اکثر موارد نحوه توزیع طبیعی جریان‌های سطحی در نواحی مختلف کشور با نیازهای زمانی حوضه‌های آبریز منطبق نبوده و ضرورت مهار و کنترل چنین جریان‌های سطحی را به وجود آورده است. برآورد حجم رواناب ناشی از نزولات جوی و تغییرات کمی و کیفی آن از مهم‌ترین اقدامات در جهت مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب موجود است. امروزه استفاده از روش‌های نوین و غیرمستقیمی همچون مدل‌های هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز و محاسبه حجم رواناب تولید شده در حوضه‌ها به‌عنوان عاملی مهم در وقوع سیل، سبب سهولت در انجام محاسبات و صرفه‌جویی در زمان و هزینه شده است. ازاین‌رو کاربرد چنین ابزارهایی در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و اجرای طرح‌های آبی روندی افزایشی دارد (**زمان‌پور و همکاران، ۱۳۹۷**). در میان نواحی مختلف ایران، شمال کشور به‌ویژه غرب استان گیلان با توجه به شرایط اقلیمی حاکم از نظر درصد بروز سیل، رتبه بالایی را به خود اختصاص می‌دهد که حوضهٔ کرگانرود تالش، واقع در این استان نیز از این امر مستثنی نبوده است؛ زیرا وجود بارندگی‌های منظم جوی، مجاورت با دریای خزر و رشته‌کوه‌های تالش باعث تشکیل دامنه‌های جنگلی و پرشیب شده که آن منطقه را مستعد پدیدهٔ سیلاب کرده است و گسترش روند آن در طول سال‌های متمادی می‌تواند برای ساکنین آن منطقه مشکل‌ساز شود. از طرفی دیگر دخل و تصرف غیرمسئولانه و سوء مدیریت در استفاده از منابع طبیعی به‌مانند برداشت بی‌رویهٔ درختان جنگلی، تغییرات کاربری اراضی و احداث سازه‌های انسانی در

بستر و حریم رودخانه، در بروز رواناب مازاد بر نفوذ و درنتیجه مخاطرۀ سیل بسیار مؤثر بوده است. شهرستان تالش از نظر موقعیت جغرافیایی خود در بین دو واحد بزرگ ساختمانی البرز–تالش و دریای خزر، محیط مناسبی را برای تشکیل اشکال و پدیده‌های ژئومورفولوژیکی فراهم ساخته است. بخصوص با دارا بودن شرایط اقلیمی و محیطی متفاوت در طول سال‌های گذشته دچار خسارات فراوان از آسیب‌های طبیعی گردیده که بدون شک پدیدۀ سیل به‌عنوان یکی از جدی‌ترین خطرات و بلایای طبیعی این منطقه محسوب می‌شود. در طول سالیان متمادی مردم این نواحی به دلیل ویژگی‌هایی همچون: مرغوبیت خاک منطقه و ذخیره آب کافی، اغلب بدون در نظر گرفتن دورۀ بازگشت و حجم رواناب تولید شده در هرسال و با وجود تهدیدهای حاکم، در حاشیۀ رودخانه‌ها سکونت گزیده و گسترش یافته‌اند؛ اما با توجه به اهمیت رودخانه‌های استان گیلان و جنبۀ اقتصادی فراوان آن‌ها، تاکنون مطالعات ویژه‌ای بر روی آن‌ها انجام نشده و متأسفانه در هیچ‌یک از پژوهش‌های انجام شده ساماندهی و مدیریت سیلاب به‌صورت جدی صورت نگرفته است. مدل SWAT یکی از ابزارهای تحلیلی برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز پیچیده است که با توجه به تغییرات خاک، کاربری اراضی، کیفیت آب و شرایط اقلیمی در طولانی‌مدت و حوضه‌هایی که فاقد آماربرداری منظم هستند، کاربرد دارد (گاسمن و همکاران[1]، ۲۰۰۷). مدل SIMHYD نیز به‌عنوان مدل مفهومی ساده بارش–رواناب به شکلی یکپارچه عمل کرده و در مطالعات مربوط به شبیه‌سازی رواناب (پیل و همکاران[2]،۲۰۰۲)، تأثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب (شن و همکاران[3]، ۲۰۰۷) و ارزیابی منطقه‌ای (چیو و سیریواردنا[4]، ۲۰۰۵) به‌صورت موفقیت‌آمیزی عمل کرده است. امروزه این ابزارها بسیار موردتوجه جغرافیدانان و مهندسین منابع آب داخلی و خارجی در بحث مدیریت منابع آب واقع شده است.

حبیبی و گودرزی (۱۳۹۷) در تحقیق خود کاربرد مدل نیمه توزیعی SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه حبله‌رود را بررسی کرده‌اند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که از مدل SWAT می‌توان برای شبیه‌سازی رواناب در مقیاس زمانی ماهانه در حوضۀ موردنظر برای برنامه‌ریزی‌های منابع آبی و اقدامات مدیریتی لازم در این حوضه به‌خوبی استفاده نمود. **دستجردی و همکاران (۱۳۹۸)** در پژوهش خود کارایی دو مدل هیدرولوژیکی AWBM و SIMHYD و شبکه عصبی (Mlp و Rbf) را برای شبیه‌سازی بارش–رواناب در منطقه حوضۀ باراریه نیشابور مقایسه کرده و نتایج حاصل نشان می‌دهد که تطابق زیادی بین مقادیر اوج بارندگی با اوج رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل‌ها و رواناب حداکثر خروجی از حوضه، وجود دارد. **گودرزی و فاتحی‌فر (۱۳۹۸)** با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT در محیط GIS در پهنه‌بندی خطر

1 Gassman et al
2 Peel et al
3 Chen et al
4 Chiew and Siriwardena

سیلاب در اثر تغییرات اقلیمی تحت سناریو RCP 8.5، مطالعه‌ای در حوضۀ آذرشهر چای انجام داده‌اند و نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها حاکی از آن است که ممکن است در یک زیرحوضۀ کوچک در اواسط حوضه به جهت داشتن شرایط مستعد سیل مانند شیب فراوان، داشتن شکلی گرد، خاک نفوذناپذیر یا پوشش‌گیاهی ضعیف، در اثر باران‌های شدید اقلیمی دبی سیلابی بزرگی به وقوع بپیوندد. **قضاوی و همکاران(۱۳۹۹)** در طی پژوهشی به بررسی کارایی مدل SWAT در برآورد دبی‌های روزانه حوضه‌های فاقد آمار با رویکرد منطقه‌بندی در مناطق خشک پرداخته و نتایج حاصل از پژوهش آنان نشان می‌دهد که خروجی‌های به دست آمده موفقیت‌آمیز و قابل‌قبول بوده و استخراج این نتایج می‌تواند به درک و شناخت بهتری از رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های فاقد آماربرداری برای اهدافی چون برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب ازجمله کنترل سیل و تأمین آب شرب و کشاورزی منجر شود. **بالویی و همکاران(۱٤۰۰)** کارایی مدل SWAT را در شبیه‌سازی رواناب و رطوبت موجود در خاک در حوضه دویرج استان ایلام بررسی نموده‌اند. این مدل در شبیه‌سازی بیلان آبی موجود در این حوضه عملکرد بسیار مؤثر داشته و قابل استفاده برای پردازش سایر ویژگی‌های حوضه دویرج نیز می‌باشد. اسکوبار و همکاران[1] (۲۰۱۵) حوضه آبریز مولاوین، به‌عنوان ذخیره‌گاه جنگلی ماکیلینگ را با استفاده از پنج مدل مفهومی توده‌ای بارش–رواناب شبیه‌سازی کرده و آن‌ها پس از مدل‌سازی با توجه به نتایج خود پنج الگوریتم موجود در نرم‌افزار RRL را از بهترین تا ضعیف‌ترین طبقه‌بندی نمودند که آرایش مدل‌ها عبارتند از: Tank، SIMHYD، SACRAMENTO، SMAR و AWBM. هونگیان و همکاران[2] (۲۰۱۷) به ارزیابی در رابطه با توانایی و سازگاری مدل SIMHYD در حوضه رودخانه سونگوا پرداختند. آن‌ها دریافتند که استفاده از این مدل در مناطق نیمه‌مرطوب بهتر از مناطق نیمه‌خشک است. این مدل همچنین دو مکانیسم تولید رواناب ، ذخیره‌سازی و نفوذ بیش‌ازحد را در نظر می‌گیرد ، با ساختار ساده و محاسبه راحت نیاز به پارامترهای کمتری دارد. اما این مدل در اوج سیل دارای یک خطای شبیه‌سازی بزرگ است. با توجه به تأثیر توزیع نابرابر باران و جاری شدن سیل، حوضه به چندین بلوک تقسیم می‌شود. درنتیجه هر بلوک برای محاسبه تلاقی به‌طور جداگانه به چندین واحد تقسیم شده و سرانجام به‌صورت خطی در ایستگاه خروجی قرار می‌گیرند که ازاین‌جهت می‌تواند صحت مدل را بیشتر بهبود ببخشد و از این نظر برای ارتقا بیشتر مدل در حوضه رودخانه سونگوا از اهمیت بسیاری برخوردار است. یو و همکاران[3] (۲۰۱۸) مقاله خود را با عنوان بهبود مدل SWAT برای شبیه‌سازی مبتنی بر رویداد سیل در بازه زمانی روزانه ارائه نمودند. نتایج درجه‌بندی و اعتبارسنجی داده‌های روزانه نشان‌دهندۀ بهبود عملکرد شبیه‌سازی به‌ویژه شبیه‌سازی پیک سیلاب است. آن‌ها همچنین معتقدند بهبود این مدل، پایه و اساس رسیدگی به مسائل مربوط

1 Escobar et al
2 Hongyan et al
3 Yu et al

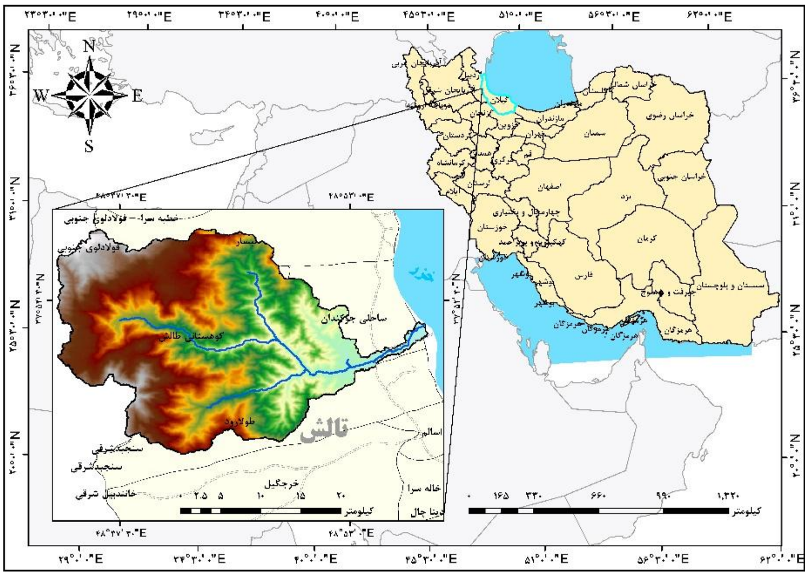
به کیفیت آب ناشی از وقوع سیل خواهد بود. فرهان و عابد[1] (۲۰۲۱) رواناب سطحی در بحرالنجف را با استفاده از مدل SWAT برآورد نموده‌اند. سه سناریو فرضی بر اساس میزان بارندگی مفروض اجرا شد که نتایج نشان دادند سه سطح آب منجر به پرشدن دریاچه محصور، کل منطقه موردمطالعه و فراتر رفتن از مرزها و نیز باعث سیل بخشی از شهر باستانی نجف شده است. سیلوا دیاس و همکاران[2] (۲۰۲۱) عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای را با استفاده از مدل‌های SWAT و HEC-HMS ارزیابی کرده و به این نتیجه رسیدند که با توجه به شاخص‌های به دست آمده، هر دو سیستم نرم‌افزاری به‌طور رضایت‌بخشی قادر به شبیه‌سازی جریان بودند. باسو و همکاران[3] (۲۰۲۱)، ابوزریگ و بنی هانی[4] (۲۰۲۱) و دالیسون و همکاران[5] (۲۰۲۲) نیز با استفاده از مدل SWAT در پژوهش خود توانستند به نتایج خوبی دست یابند. تحت شرایط این مطالعه، SWAT نسبت به HEC-HMS برتری دارد و از نظر آماری برای پیش‌بینی‌های آینده مناسب‌تر است.

۲- مواد و روش

۲-۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز کرگانرود

حوضهٔ آبریز کرگانرود با مساحتی بالغ بر ۶۱۵/۴ کیلومترمربع و با محیطی حدود ۱۲۷ کیلومتر یکی از رودخانه‌های شهرستان تالش و همین‌طور از مهم‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه‌های استان گیلان می‌باشد که در شمال‌غرب این استان از ارتفاعات ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متری تالش با مختصات جغرافیایی ً ۲۴ َ ۴۱ □۳۷ تا ً ۲۴ َ ۵۸ □۳۷ عرض‌شمالی و ً ۴۸ َ ۳۱ □۴۸ تا ً ۴۸ َ ۵۸ □۴۸ طول‌شرقی سرچشمه گرفته است. از نظر تقسیمات سیاسی این حوضه از شمال به حوضه هره‌دشت لیسار، از جنوب به حوضه ناورود اسالم، از غرب به استان اردبیل حوضه آبریز آرپاچای و هروآباد و از شرق به دریای خزر محدود می‌شود (شکل ۱).

1 Farhan and Abed
2 Silva Dias et al
3 Basu et al
4 Abu-Zreig and Bani Hani
5 Dallison et al



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز کرگانرود تالش

۲-۲- معرفی مدل SWAT

SWAT مخفف عبارت Soil and Water Assessment Tools می‌باشد که یک مدل پیوسته و نیمه توزیعی بوده و توسط جف آرنولد (آرنولد و همکاران[1]، ۱۹۹۸) برای سرویس تحقیقاتی کشاورزی آمریکا توسعه یافته است. این مدل برای ارزیابی اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت مدیریت بر روی آب، رسوب، مواد شیمیایی و کشاورزی در حوضه‌ها انجام می‌شود. مدل SWAT دارای مبنای فیزیکی بوده و شامل دو بخش اصلی است. در بخش اول میزان آب، رسوب، فرسایش خاک، رشد گیاه، مواد مغذی و آفت‌کش‌هایی که وارد آبراههٔ اصلی می‌شوند را کنترل می‌کند و در بخش دوم روندیابی و جهت جریان آب، حرکت رسوبات و شرایط آب و هوایی در یک حوضهٔ آبریز شبیه‌سازی می‌شود. تلفیق GIS با مدل نیمه فیزیکی SWAT باعث شده است تا قدرت تحلیل لایه‌های اطلاعاتی به‌منظور ایجاد لایه‌های جدید افزایش یابد و در مدیریت سیستم‌های پیچیده آبی نقشی کاربردی ایفا کند. چرخه هیدرولوژیکی این مدل بر معادله بیلان آبی هر HRU استوار است (آبابایی و سهرابی، ۱۳۸۸). به‌طورکلی معادله بیلان آبی، اصلی‌ترین معادله در هر نوع فرآیند موجود در مدل SWAT می‌باشد.

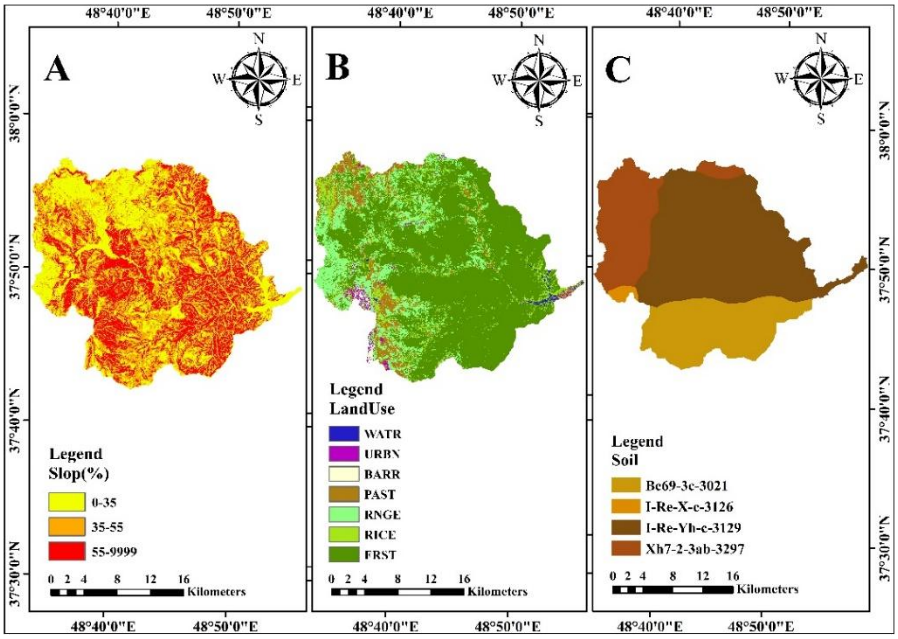
$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

1 Arnold et al

در این معادله SW_t ذخیره رطوبت نهایی در خاک (mm)، t زمان، SW_0 مقدار اولیه آب در خاک (mm)، R_{day} میزان بارش روزانه، Q_{surf} میزان رواناب سطحی روزانه (mm)، E_a میزان تبخیر و تعرق روزانه (mm)، W_{seep} میزان آبی که از پروفیل خاک به منطقه غیراشباع نفوذ می‌کند (mm) و Q_{gw} میزان جریان نفوذی در سفره زیرزمینی به‌صورت روزانه (mm)، می‌باشد (نیچ و همکاران[1]، ۲۰۰۵).

۲-۳- داده‌های ورودی مدل

ورودی‌های مدل SWAT برای انجام شبیه‌سازی شامل نقشه رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر، نقشه شیب طبقه‌بندی شده با استفاده از روش SCS، نقشه خاک برش خورده از نقشه جهانی خاک ایران و نقشه کاربری اراضی تهیه شده از تصاویر سنجنده چندطیفی OLI ماهواره لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۱۸ می‌باشد که با استفاده از روش تصحیح اتمسفری سریع (QUAC) و روش حداکثر احتمال در محیط ENVI ترسیم شده و با نتایج ضریب کاپا (Kappa= 0/97) و دقت کلی (Overal accuracy= 0/98) بالا به دست آمده است (شکل ۲). همچنین از آمار و اطلاعات روزانه و ماهانهٔ ماکزیمم و مینیمم دما، بارش، رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش خورشیدی مربوط به سه ایستگاه تالش، آستارا و بندرانزلی به‌عنوان ورودی‌های این مدل نیز استفاده شده است (جدول ۱).



شکل ۲- A) نقشه شیب، B)کاربری اراضی و C) خاک حوضه کرگانرود به‌عنوان ورودی مدل SWAT

---

1 Neitch et al

جدول ۱- اطلاعات ایستگاه‌های منتخب برای مدل‌سازی

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا	نوع ایستگاه	دوره آماری
تالش	٤٨□٤٩′٥٣"E	۳۷□۲۱′٥٠"N	۷	سینوپتیک	۲۰۰٦-
بندر آستارا	٤٨□٥١′١٥"E	۳۸□٥٤′۲۱"N	-۲۱/۱	سینوپتیک	۲۰۰٦-
بندر انزلی	٤٩□۲۷′۲۷"E	۳۷□ ٤۷′۲۸"N	-۲۳/٦	سینوپتیک	۲۰۰٦-
هشتپر	٤٩□۲۹′٥٤"E	۳۷□ ٤٩′٤٨"N	۳٥	هیدرومتری	۲۰۰٦-

در این تحقیق برای بررسی میزان سیل‌خیزی حوضه آبریز کرگانرود از پارامترهای شماره منحنی (CN) در بازه صفر تا ۱۰۰، Q_{surf} میزان رواناب سطحی روزانه (mm)، R_{day} میزان بارش روزانه و S پارامتر نگهداشت رطوبت (mm) مطابق بر معادله زیر استفاده شده است:

$$S = 25/5\left(\frac{1000}{CN} - 10\right)$$

۲-٤- مدل SIMHYD

نرم‌افزار RRL[1] با استفاده از داده‌های مشاهداتی بارش، تبخیر و تعرق و دبی مشاهداتی برای شبیه‌سازی یک مدل بارش-رواناب تهیه و تدوین شده است. این نرم‌افزار حاوی پنج مدل بارش-رواناب توده‌ای عادی، روش‌های بهینه‌سازهای واسنجی و ابزاری برای سهولت در واسنجی مدل است که این مدل‌ها عبارتند از: AWBM، SIMHYD، TANK، SMAR و SACRAMENTA. مدل مفهومی یکپارچۀ SIMHYD[2]، نسخۀ ساده‌شدۀ نرم‌افزار HYDROLOG مربوط به سال ۱۹۷۲ و نرم‌افزار MODHYDROLOG مربوط به سال ۱۹۹۱ است که یکی از کاربردی‌ترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی بارش-رواناب محسوب می‌شود. این مدل برای ارزیابی رواناب از سه منبع استفاده می‌کند که عبارتند از: رواناب مازاد بر نفوذ، جریان زیرسطحی و رواناب مازاد بر اشباع و جریان پایه. میزان تغذیه آب زیرزمینی که تابعی خطی از رطوبت خاک می‌باشد نیز توسط مدل SIMHYD برآورد می‌گردد (پودگر[3]، ۲۰۰۳). درواقع عملکرد مدل SIMHYD به این صورت است که ابتدا ذخایر خالی‌شدۀ برگاب، توسط تبخیروتعرق به‌وسیلۀ بارش روزانه پر می‌شود. سپس بارش مازاد تحت تأثیر یک تابع نفوذ قرارگرفته و ظرفیت نفوذ را مشخص می‌نماید. بارش مازادی که از ظرفیت نفوذ فراتر رفته و تجاوز می‌کند، رواناب را به وجود می‌آورد. رطوبت نفوذ کرده تحت تأثیر یک تابع رطوبتی خاک قرارگرفته که این رطوبت به جریان‌های داخلی، آب‌های زیرزمینی و ذخایر رطوبت خاک می‌پیوندد؛ بنابراین این مدل بر اساس داده‌های مشاهداتی بارش، تبخیروتعرق و دبی رودخانه، می‌تواند رواناب را در محدوده زمانی

1 Rainfall Runoff Library
2 Simple Hydrology
3 Geoff Podger

موردنظر شبیه‌سازی کند که در این تحقیق از داده‌های مشاهداتی به‌صورت روزانه در بازۀ زمانی ۱۳ ساله بهره گرفته شده است.

۲-۵- داده‌های ورودی مدل SIMHYD

ازآنجایی‌که مدل SIMHYD نسبت به مدل SWAT از ورودی‌های کمتری برخوردار است براین اساس سه نوع ورودی ازجمله داده‌های تبخیروتعرق و میزان بارش از سازمان آب و هواشناسی استان گیلان و داده‌های مشاهداتی مربوط به دبی جریان از سازمان آب‌منطقه‌ای این استان مربوط به ایستگاه سینوپتیک تالش و ایستگاه هیدرومتری هشتپر که در قسمت خروجی رودخانه قرارگرفته است، در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸ تهیه گردید و به فرمت مخصوص نرم‌افزار مرتب شده، سپس برای مدل تعریف شده است. به دلیل تازه تأسیس بودن ایستگاه مورد استفاده در شبیه‌سازی و همچنین عدم وجود سنوات آماری کافی بلندمدت، لذا این محدوده آماری برای انجام مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. در این مدل ضریب نش- ساتکلیف (EN2) به‌عنوان تابع هدف که اختلاف میان داده‌های مشاهداتی با مقادیر شبیه‌سازی شده را نمایش می‌دهد، ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز برای مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اجرای مدل و شبیه‌سازی هیدرولوژیکی رواناب توسط SWAT-CUP

پس از تعریف کردن تمامی نقشه‌ها و داده‌های ورودی به مدل، همچنین در صورت نیاز برای دریافت نتایجی با دقت بالا مدیریت‌های مربوط به خاک، کاربری اراضی، آبیاری یا در صورت وجود سد و غیره اطلاعات مربوط به آن در مدل اعمال شده سپس در مرحله نهایی تاریخ شروع و اتمام دوره شبیه‌سازی از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸، تعداد سال‌های گرم شدن مدل[1] به مدت سه سال تعیین گردید و مرحله مدل‌سازی به‌صورت روزانه اجرا شد. یکسری اطلاعات خروجی شبیه‌سازی شده به شکل فایل Textinout تولیده شده که این خروجی‌ها به نرم‌افزار SWAT-CUP به‌منظور انجام فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی با تعیین الگوریتمی که مدل بر اساس آن کالیبره خواهد شد، افزوده شدند. با توجه به مدل‌سازی انجام گرفته و نتایج حاصل از گزارش مدل SWAT، میانگین تبخیروتعرق را به میزان ٤٦٩ میلی‌متر، میانگین بارش ۹٦۲ میلی‌متر در حوضه آبریز کرگانرود محاسبه نموده است. با در نظر گرفتن اقلیم حاکم بر حوضه کرگانرود تالش، نوع پوشش‌گیاهی منطقه که بخش وسیعی از حوضه آبریز را پوشش جنگلی دربرگرفته است، از طرفی دیگر

1 Warm Up

کشت برنج در بخش کشاورزی کرگانرود به‌عنوان گیاهی با نیاز آبی بسیار بالا و بیشترین تغذیه توسط بارندگی و درنهایت با توجه به گروه هیدرولوژیکی خاک‌های واقع در حوضه، این‌طور استنباط می‌شود که مقادیر به دست آمده با مقادیر موجود در واقعیت هماهنگی داشته و منطقی به نظر می‌رسد.

۳-۲- واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

جهت بهبود نتایج شبیه‌سازی و اطمینان دقیق از شباهت و هماهنگی بالای مقادیر بارش-رواناب تولید شده با مقادیر موجود در واقعیت ضرورت انجام واسنجی و اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی شده، فراهم می‌شود. برای این کار در ابتدا پس از تعریف پروژهٔ Textinout به‌عنوان خروجی حاصل از مدل‌سازی در SWAT، در محیط SWAT-CUP افزوده شده و الگوریتم SUFI2 به‌عنوان روش منتخب برای انجام کالیبراسیون انتخاب شده است؛ زیرا این روش به‌راحتی می‌تواند حجم وسیعی از داده‌های مشاهداتی را پردازش کرده و امکان کالیبراسیون همزمان پارامترها بر پایه داده‌های ارزیابی شده در متغیرهای متفاوت را دارا می‌باشد. سپس بعد از وارد کردن داده‌های دبی رودخانه با فرمت نرم‌افزار، در ابتدا پارامترهای احتمالی با توجه به بررسی تجربیات پژوهش‌های گذشته توسط دیگران مانند بویتیاس و همکاران[1] (۲۰۱۷)، شکوهی‌فر و همکاران (۲۰۲۱)، **نیکخو امیری و همکاران(۱۳۹۸)**، **طالبی و همکاران(۱۳۹۹)** جهت برآورد جریان، جمع‌آوری شده سپس به سوات‌کاپ معرفی و آنالیز حساسیت برای ۲۵۵۶ داده به‌صورت روزانه انجام گرفت. دامنه‌ای از مقادیر حداکثر و حداقل برای هر پارامتر در نظر گرفته شد و سپس با بررسی خروجی کالیبراسیون و تولید ضریب نش مناسب، از میان تمام پارامترهای آنالیز شده، ۲۳ پارامتر مؤثر با حساسیت بالا در تولید رواناب با ۵۰۰ بار تکرار در شبیه‌سازی و نمونه‌برداری تعیین گردید و تثبیت شد. این پارامترهای مؤثر در تولید رواناب در (جدول ۲) نمایش داده شده است.

1 Boithias et al

جدول ۲- پارامترهای مؤثر در تولید رواناب

درجه حساسیت	نام پارامتر	شرح پارامتر	حداکثر	حداقل
۱	CN2	شماره منحنی	-۰/۲	-۰/۸
۲	CH_N2	ضریب مانینگ در رودخانه اصلی	۰/۱۵	۰
۳	CH-K2	ضریب هدایت هیدرولیکی مؤثر کف رودخانه اصلی	۱۳۰	۸۰
٤	SFTMP	متوسط دمای هوا برای تبدیل باران به برف(C°)	۰	-۵
۵	TIMP	فاکتور تأخیر دمای توده برف	۰/۷۵	۰/۲۵
٦	SOL_K	ضریب هدایت هیدرولیکی خاک(mm/hr)	-۰/۲	-۰/۸
۷	GWQMN	لایه یا برگشتی اتفاق بیفتد (mmH2O) کم عمق برای این که	٤۲۰۰	۲۸۰۰
۸	SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس خاک(mmH2O/mm)	-۰/۲	-۰/۷
۹	SOL_BD	جرم مخصوص خاک(gr/cm^3)	-۰/۲	-۰/۸
۱۰	RCHRG_DP	ضریب نفوذ آبخوان	۰/۷۵	۰/۲۵
۱۱	ALPHA_BNK	ضریب a جریان پایه برای ذخیره (روز)	۱	۰/۵
۱۲	ALPHA_BF	جریان پایه a ضریب	۱	۰/۵
۱۳	SMFMN	نرخ ذوب برف در ۲۱ دسامبر (mmH2O/C°- day)	۱۰	۵
۱٤	GW_REVAP	ضریب برگشت آب زیرزمینی از لایه کم عمق به لایه	۰/۲	۰/۱
۱۵	CANMX	حداکثر آب ذخیره شده در تاج گیاه برای مرتع	۵۰	۰
۱٦	SLSUBBSN	متوسط طول شیب (m)	-۰/۳	-۰/۸
۱۷	ESCO	ضریب جبران تبخیرخاک	۱	۰/۷
۱۸	CANMX	حداکثر آب ذخیره شده در تاج گیاه برای برنج	۵۰	۰
۱۹	CANMX	حداکثر آب ذخیره شده در تاج گیاه برای جنگل	۵۰	۰
۲۰	DEEPST	عمق آب در آبخوان عمیق	۱۵۰۰۰	۷۰۰۰
۲۱	SMFMX	نرخ ذوب برف در ۲۱ ژوئن(mmH2O/C°- day)	۵	۰
۲۲	SMTMP	دمای ذوب توده برف(C°)	۵	۰
۲۳	EPCO	ضریب جبران جذب گیاه	۱	۰/۷

به‌طورکلی یک دورهٔ ۱۳ ساله برای شبیه‌سازی رواناب به شکل روزانه تعیین گردید. بدین‌گونه که داده‌های مربوط به سال ۲۰۰٦ تا ۲۰۰۸ برای دوره سازگار شدن مدل، از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵ یک دوره آماری ۷ساله برای اجرای فرآیند واسنجی مدل و یک دوره سه‌ساله از سال ۲۰۱٦ تا ۲۰۱۸ برای فرآیند اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. همچنین در این فرآیند ضریب نش ساتکلیف(NS) به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است که میزان اختلاف رواناب مشاهداتی با رواناب شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

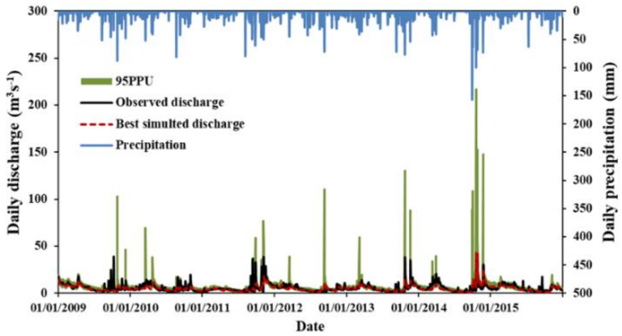
۳-۳- نتایج حاصل از انجام فرآیند شبیه‌سازی رواناب روزانه و ماهانه مدل SWAT

در فرآیند واسنجی، تغییر مقادیر پارامترها باید به‌گونه‌ای انجام شود که در نمودار شبیه‌سازی شده علاوه بر تولید ضریب نش ساتکلیف مناسب، نتایج تا حد زیادی در محدوده باند عدم قطعیت ۹۵٪ واقع شود. به همین دلیل هر چه ضریب p_factor به یک و ضریب r_factor به صفر نزدیک‌تر باشد، نتایج به دست آمده از دقت بالایی در شبیه‌سازی برخوردار است. اجرای واسنجی تا زمانی ادامه می‌یابد که بر اساس الگوریتم

انتخاب شده ضرایب موردنیاز با مقادیر قابل قبولی محاسبه شوند. در (جدول و شکل ۳) نتایج حاصل از فرآیند کالیبراسیون نمایش داده شده است.

جدول ۳- نتایج دقت ضرایب ارزیابی مدل در مرحله واسنجی دبی روزانه

نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل	ضریب نش- ساتکلیف(NS)	ضریب تبیین(R^2)	ضریب r-factor	ضریب p_factor
مرحله واسنجی	۰/۵۰	۰/۵۲	۱/۲۰	۰/۸۵

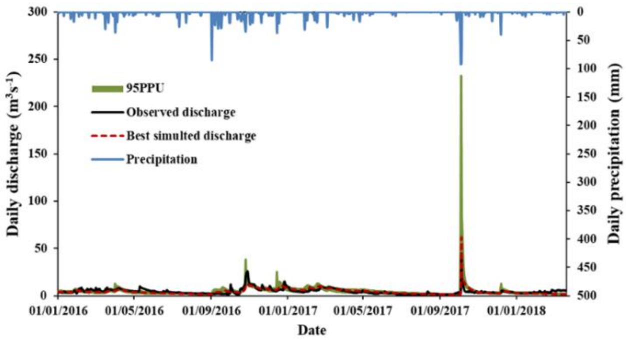


شکل ۳- نمودار باند عدم قطعیت برای مرحله واسنجی دبی روزانه حوضه کرگانرود

پس‌ازاینکه بر روی مدل شبیه‌سازی شده فرآیند کالیبراسیون انجام گرفته و پارامترها تعدیل گردید، مدل در بازه زمانی مستقلی از مرحله واسنجی، با داده‌های مشاهداتی مربوط به سال‌های جدید به فرمت نرم‌افزار تعریف شده و فرآیند اعتبارسنجی انجام می‌شود. در این مرحله داده‌های دبی روزانه حوضه کرگانرود از سال ۲۰۱٦ تا ۲۰۱۸ مربوط به ایستگاه هیدرومتری هشتپر با همان ۲۳ پارامتر مرحله واسنجی و در همان بازهٔ مقادیر حداکثر و حداقل با تکرار ۵۰۰ بار در هر شبیه‌سازی استفاده شده است. نتایج این مرحله در (جدول و شکل ٤) نشان داده شده است.

جدول ٤- نتایج ضرایب به دست آمده در مرحله اعتبارسنجی دبی روزانه

نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل	ضریب نش- ساتکلیف(NS)	ضریب تبیین(R^2)	ضریب r-factor	ضریب p_factor
مرحله اعتبارسنجی	۰/۵۳	۰/٦۰	۱/۱٦	۰/۷۱



شکل ٤- نمودار باند عدم قطعیت برای مرحله اعتبارسنجی دبی روزانه حوضه کرگانرود

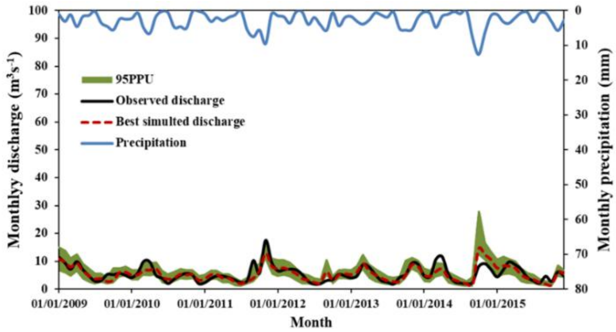
همان‌گونه که از نمودارهای خروجی حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی استنباط می‌شود، مدل مقادیر شبیه‌سازی را در برخی روزها بیشتر از مقادیر مشاهداتی برآورد کرده است و مقادیر شبیه‌سازی شده از حالت یکنواختی پیروی می‌کنند. از علت‌های اصلی این موضوع از نگاه شن و همکاران[1] (۲۰۱٤)، وجود محدودیت در مدل SWAT در توزیع بارش از لحاظ مکانی است. به‌طور مثال اگر در بخشی از حوضهٔ آبریز بارندگی با شدت بیشتری رخ دهد، مدل این حجم از بارش را در تمام زیرحوضه‌ها تأثیر می‌دهد و درنهایت باعث شبیه‌سازی دبی بیش از مقادیر مشاهداتی می‌شود. از دیگر عوامل تأثیرگذار براین موضوع عدم وجود ایستگاه‌های کافی در منطقه است که عواملی چون توپوگرافی‌های متنوع ازجمله کوهستانی و جنگلی بودن منطقه، عدم نیاز سازمان‌های هواشناسی و آب منطقه‌ای به ایستگاه‌های بیشتر، از دلایل کمبود ایستگاه‌های موردنیاز برای مدل است. از منظری دیگر کیفیت پایین داده‌های ثبت شده توسط سازمان‌ها یا وجود داده‌های مفقود شدهٔ بسیاری در میان ورودی‌ها از مهم‌ترین دلایل مؤثر در خروجی مدل است که مانع از شبیه‌سازی دقیقاً مطابق با واقعیت می‌شود. برای اطمینان از نتایج به دست آمده و همچنین مطالعهٔ پژوهش‌های مشابه انجام شده در فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی به‌صورت روزانه، بار دیگر داده‌های مشاهداتی به شکل ماهانه تعریف شده و مطابق با شبیه‌سازی روزانه از همان پارامترها با مقادیر تعیین شده استفاده شده است؛ زیرا وجود تعداد بسیار زیاد و متنوع داده‌های مشاهداتی در مدل‌سازی روزانه، کیفیت پایین و یا وجود مقادیر مفقود شده در داده‌های روزانه ثبت شده توسط ایستگاه‌ها از دلایلی بشمار می‌آیند که می‌توانند نتایج مدل‌سازی را تحت تأثیر خود قرار دهند؛ بنابراین فرآیند واسنجی بار دیگر در محدوده زمانی ۲۰۰٦ تا ۲۰۱۵ با در نظر گرفتن سه سال اول برای سازگار شدن مدل (Warmup) و سه سال آخر نیز از سال ۲۰۰۱٦ تا ۲۰۱۸ برای اعتبارسنجی به‌صورت ماهانه انجام شده است (جدول و شکل ۵ و ٦).

---

1 Chen et al

جدول ٥- نتایج دقت ضرایب ارزیابی ماهانه مدل در مرحله واسنجی دبی ماهانه

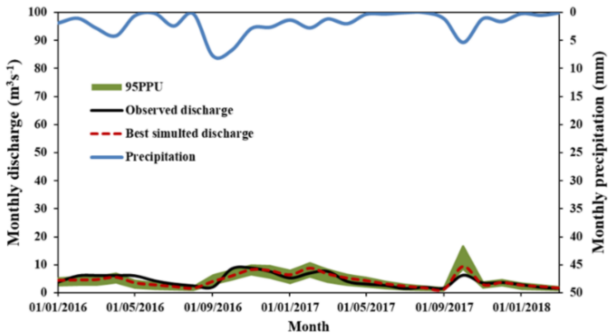
نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل	ضریب نش- ساتکلیف(NS)	ضریب تبیین(R^2)	ضریب r-factor	ضریب p_factor
مرحله واسنجی	۰/٦۱	۰/٦۲	۱/٥۱	۰/۸۹



شکل ٥- نمودار باند عدم قطعیت ماهانه برای مرحله واسنجی دبی ماهانه حوضه کرگانرود

جدول ٦- نتایج ضرایب ماهانه به دست آمده در مرحله اعتبارسنجی دبی ماهانه

نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل	ضریب نش- ساتکلیف(NS)	ضریب تبیین(R^2)	ضریب r-factor	ضریب p_factor
مرحله اعتبارسنجی	۰/٦۷	۰/۷۰	۱/٤۲	۰/۸۱



شکل ۸- نمودار باند عدم قطعیت ماهانه برای مرحله اعتبارسنجی دبی ماهانه حوضه کرگانرود

با نگاه اجمالی به مقادیر به دست آمده در شبیه‌سازی رواناب به‌صورت روزانه و ماهانه مطابق با نظریه موریاسی و همکاران[1] (۲۰۰۷)، عباسپور و همکاران (۲۰۰۷)، آی ال[2] (۲۰۱۷) و **کرمی و بیاتی خطیبی(۱۳۹۸)**، اگر مقدار تابع هدف در نظر گرفته شده به‌عبارت‌دیگر ضریب نش ساتکلیف(N2) میان

1 Moriasi et al
2 Ayele et al

۰/۶–۰/۵ ارزیابی شود نتایج به دست آمده رضایت‌بخش خواهد بود و اگر مقدار تابع هدف میان ۰/۷–۰/۶ باشد در ردیف نتایج خوب قرار می‌گیرد؛ بنابراین با توجه به این موضوع مقادیر حاصل از فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی در این مطالعه موردپذیرش بوده و از نتایج خوبی برخوردار است (جدول ۷).

جدول ۷- مقادیر و طبقات ضرایب R^2 و NS،

طبقات	مقادیر	شاخص	طبقات	مقادیر	شاخص
ناکارآمد	<۰/۴	NS	ناکارآمد	۰/۵	R^2
قابل‌قبول	۰/۵ –		رضایت‌بخش	۰/۵ – ۰/۶	
رضایت‌بخش	۰/۶۵		خوب	۰/۶ – ۰/۷	
خوب	۰/۷۵		خیلی خوب	۰/۷ – ۱	
خیلی خوب	۱ –				

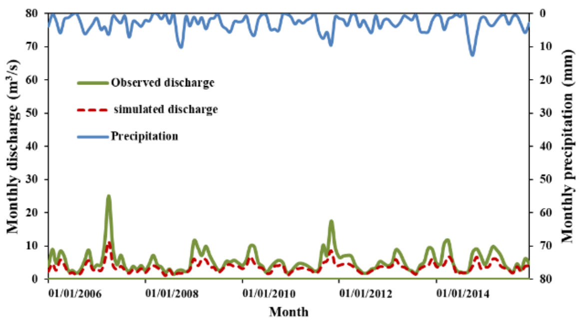
منبع: موریاسی و همکاران(۲۰۰۷)، عباسپور و همکاران(۲۰۰۷)، آی آل(۲۰۱۷) و کرمی و بیاتی خطیبی(۱۳۹۸)

۳-۴- واسنجی و اعتبارسنجی مدل SIMHYD

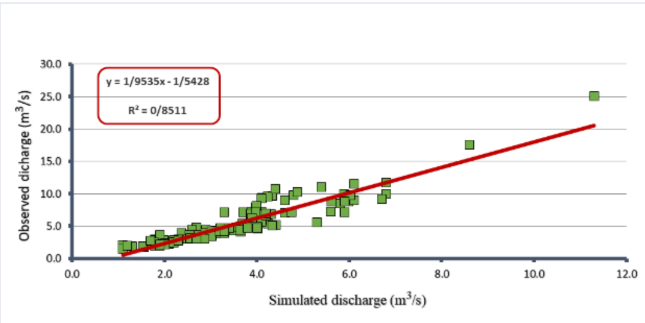
تحلیل حساسیت مدل نسبت به یک پارامتر خاص ازجمله عوامل بسیار مهم و تأثیرگذار در روند مدل‌سازی است. چراکه از این طریق می‌توان میزان تأثیر یک پارامتر را نسبت به دیگر پارامترها مشخص نمود و بهترین خروجی را به دست آورد؛ بنابراین پارامترهایی با حساسیت بالا بعد از انجام آنالیز حساسیت در شبیه‌سازی رواناب رودخانه کرگانرود تعیین شد و همچنین مقادیر حداکثر و حداقل پارامترها به دست آمد. در (جدول ۸) پارامترهای محاسبه شده برای مدل‌سازی مطابق با الگوریتم SIMHYD با روش بهینه‌سازی جستجوی الگو (pattern Search) نشان داده شده است که بیانگر ۹ پارامتر برای تخمین رواناب است. ضریب جریان پایه توسط ضرب آن در میزان رواناب سهم جریان اصلی تولید می‌شود. اختلاف میان بارش و تبخیر به‌وسیله ظرفیت ذخیره بارش در برگاب محاسبه شده و سهم نفوذپذیری مقداری از میزان کل بارش قابل‌نفوذ در خاک است. لازم به ذکر است مقادیر بهینه‌ای که نزدیک به عدد صفر باشد نشان‌دهندهٔ حساسیت پایین‌تر پارامترها در محدودهٔ موردمطالعه است. بعد از تعیین مقادیر پارامترها، ابتدا داده‌های مربوط به سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵ برای مرحله واسنجی مدل در نظر گرفته شد و سپس فرآیند کالیبراسیون صورت گرفت. برای مقایسه گرافیکی نمودارهای مربوطه برای مرحله واسنجی و اعتبار سنجی ترسیم گردید (شکل ۹ تا ۱۰). همچنین مقادیر حاصل از نتایج شبیه‌سازی انجام شده توسط مدل SIMHYD در جدول زیر نمایش داده شده است (جدول ۹ و ۱۰).

جدول ۸- مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل SIMHYD

نام پارامتر	توضیحات پارامتر	حداکثر	حداقل	مقادیر بهینه
Base flow coefficient	ضریب جریان پایه	۱	۰	۰/۰۵۸
Impervious Threshold	آستانه نفوذیذیری	۵	۰	۰/۰۵۸
Infiltration coefficient	ضریب نفوذ	۴۰۰	۰	۱۹۱/۳۷
Infiltration shape	شکل نفوذ	۱۰	۰	۴/۸۶۲
Interflow coefficient	ضریب جریان ورودی	۱	۰	۰/۰۸۶
Pervious Fraction	سهم نفوذیذیر	۱	۰	۰/۸۵
Rainfall interception store capacity	ظرفیت ذخیره برگاب بارش	۵	۰	۴/۰۳۹
Recharge coefficient	ضریب تغذیه	۱	۰	۰/۹۴
Soil moisture store capacity	ظرفیت ذخیره رطوبت خاک	۵۰۰	۱	۵۰۰



شکل ۹- مقادیر ماهانه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی مدل SIMHYD



شکل ۱۰- نمودار رگرسیون خطی میان دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده- واسنجی مدل SIMHYD

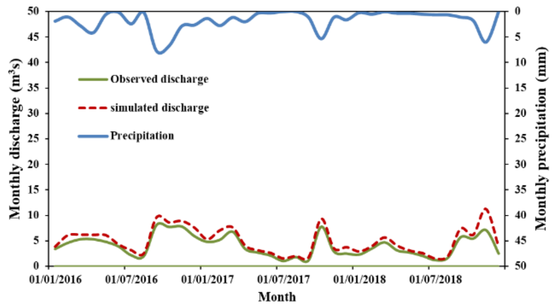
جدول ۹- مقادیر به دست آمده در فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی مدل SIMHYD

دوره زمانی	ضریب نش-ساتکلیف(E_{N2})	ضریب تبیین(R^2)
واسنجی (۲۰۱۵-۲۰۰۶)	۰/۷۱۰	۰/۸۵۱۱
اعتبارسنجی (۲۰۱۸-۲۰۱۶)	۰/۶۲۵	۰/۹۴۹۶

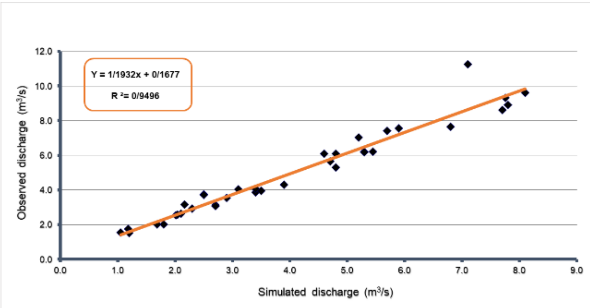
جدول ۱۰- مقادیر به دست آمده از ریشه میانگین مربعات خطا در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی SIMHYD

R(XY)	MAPE	RMSE	MSE	MAD	n	پارامترهای ریشه میانگین مربعات خطا	
۰/۹۲	۲۸/۹۱	۲/۷۲	۷/٤۰۱	۱/۸۷۲	۱۲۰	واسنجی	مقادیر پارامترها
۰/۹۷	۱۹/۳۹۷	۱/۱۷٦	۱/۳۸۲	۰/۹٤۷	۳٦	اعتبارسنجی	

سپس برای انجام صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده، از داده‌های مشاهداتی مستقل از مرحله واسنجی یعنی مربوط به سال‌های ۲۰۱٦ تا ۲۰۱۸ با همان پارامترهای مؤثر و مقادیر تعیین شده در فرآیند اعتبارسنجی در نظر گرفته شد و نتایج به دست آمده به‌صورت نمودار ترسیم شده است (شکل ۱۱ و ۱۲).



شکل ۱۱- نمودار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده – اعتبارسنجی مدل SIMHYD



شکل ۱۲- نمودار رگرسیون خطی میان دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده- اعتبارسنجی مدل SIMHYD

۳-۵- نتایج حاصل از مدل‌سازی SIMHYD

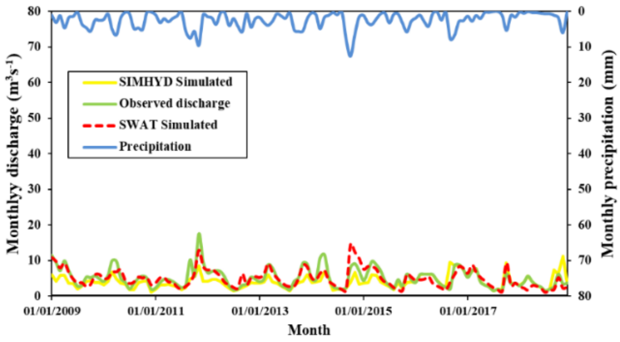
با توجه به مقادیر به دست آمده از شاخص‌های آماری داده‌های مشاهداتی در واقعیت با داده‌های شبیه‌سازی شده و با نگاه اجمالی به نمودارها، علاوه بر تطابق قابل‌قبول داده‌ها، نقطهٔ پیک و فرود رواناب به‌خوبی شبیه‌سازی شده و عدد به دست آمده توسط تابع هدف برای شبیه‌سازی صورت گرفته قابل‌پذیرش است. به‌عبارتی‌دیگر با افزایش میزان دبی مشاهداتی مقادیر شبیه‌سازی شده نیز افزایش یافته و بلعکس با

کاهش دبی جریان، رواناب شبیه‌سازی شده نیز کاهش یافته است. شاخص‌های اعتبارسنجی این مدل نیز برای سنجش کارایی مدل SIMHYD در این حوضه، جهت برآورد دبی جریان در تبیین سیلاب نیز از نتایج قابل قبولی برخوردار است. تطبیق تصویری مقادیر مشاهداتی با مقادیر شبیه‌سازی شده حاکی از مناسب بودن مقدار ضریب نش–ساتکلیف(E_{N2}) به دست آمده است.

با توجه به خروجی‌های مراحل واسنجی و اعتبارسنجی و با عنایت به نمودارها، به‌طورکلی میان دبی مشاهداتی با دبی برآورد شده توسط مدل، همبستگی و تطابق مناسبی وجود دارد و می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که با مقایسه نتایج هیدروگراف‌های نمونه، باوجود تلاش مدل SIMHYD برای شبیه‌سازی دقیق روند هیدروگراف‌ها در برخی نقاط، همچنان توانایی آن در شبیه‌سازی دبی ماهانه حوضه آبریز کرگانرود قابل‌قبول است؛ زیرا در شبیه‌سازی ماهانه به دلیل تعدیل در حداکثر و حداقل داده‌ها و نیز از بین رفتن داده‌های نامعتبر، مدل‌سازی به‌درستی و با دقت و کیفیت بالاتری صورت گرفته و نتایج قابل‌قبول‌تری را محاسبه می‌کند. این مسئله در حالی است که مدل SIMHYD در ابتدا با داده‌های ورودی روزانه شبیه‌سازی شد و نتایج بسیار ضعیفی را ارزیابی نمود. ازجمله دلایل این موضوع نیز می‌توان به کمبود ایستگاه‌های موردنیاز در حوضهٔ موردمطالعه و نیز عدم کیفیت داده‌های روزانهٔ ثبت شده به سبب تازه تأسیس بودن ایستگاه موجود در محدوده و به دنبال آن کاهش دقت مدل SIMHYD در برآورد رواناب روزانه به جهت نیاز به ورودی‌های کم‌تر نسبت به مدل SWAT را اشاره نمود.

۳–۶– ارزیابی نتایج مدل SWAT و مدل SIMHYD در برآورد سیلاب حوضه آبریز کرگانرود

با توجه به مقادیر به دست آمده توسط مدل‌ها در ماه‌های آخر سال ۲۰۱۱ و همچنین ۲۰۱۴ در مراحل واسنجی با افزایش میزان بارندگی، نقاطی به‌عنوان پیک دبی شناسایی شده است که با بررسی حوادث سیل حوضه آبریز در این بازه زمانی، مشخص گردید در شهریور و مهرماه سال‌های ۹۰و ۹۳ مطابق با پیک‌های دبی نمایش داده شده در نمودارهای خروجی، سیل در پایین‌دست حوضه که رودخانه از وسط شهرستان تالش می‌گذرد رخ داده و باعث تخریب منازل روستایی واقع در حریم رودخانه، آب‌گرفتگی معابر و تلفات جانی و مالی بسیاری شده است. در مرحله اعتبارسنجی هر دو مدل نیز به‌ویژه در مدل SWAT که شبیه‌سازی دقیق‌تری را انجام داده است، در سال ۲۰۱۸ نیز با افزایش بارندگی‌های ثبت شده و دبی مشاهداتی، نقاط پیک دبی شبیه‌سازی شده است که این امر با سیل ۵ مهرماه سال ۹۷ مطابقت می‌کند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مقادیر به دست آمده توسط مدل SWAT و مدل SIMHYD در برآورد حجم رواناب ایجاد شده به‌خوبی عمل کرده و نقاط سیل را به‌خوبی شبیه‌سازی نموده‌اند (شکل ۱۳).



شکل ١٢- مقایسه نتایج شبیه‌سازی ماهانه مدل‌های SWAT و SIMHYD با دبی مشاهداتی

٤- جمع‌بندی

با توجه به تنوع مدل‌های بارش-رواناب، انتخاب یک مدل مناسب برای حوضه‌های آبریز جهت افزایش بهره‌وری برنامه‌ریزی‌ها و مدیریت منابع آبی، امری مهم و ضروری است. به همین جهت در تحقیق حاضر نیز برای شبیه‌سازی سیلاب از دو مدل SWAT و SIMHYD بهره گرفته شده که با توجه به نتایج به دست آمده، تطبیق مدل‌ها با حوضهٔ موردمطالعه از خروجی‌های قابل‌قبول و رضایت‌بخشی به شکل ماهانه برخوردار است. به‌طورکلی هماهنگی و تطبیق نتایج مدل‌ها با شرایط واقعی حوضه آبریز کرگانرود، با وجود نواقص داده‌های مشاهداتی، مقادیر را تا حدودی به‌درستی اندازه‌گیری کرده و می‌توان برای اقدامات مدیریتی جهت تشخیص برآورد و مهار سیلاب با توجه به رواناب تولید شده به نتایج این مدل‌ها اتکا نمود. **گلشن و همکاران(١٣٩٤)**، **محضری و همکاران(١٣٩٥)**، **ابراهیمی و همکاران(١٣٩٧)**، سفیان و ماگاجی[1] (٢٠١٩) و فیری و همکاران[2] (٢٠٢١) نیز در حوضه‌هایی مشابه در شمال کشور با استفاده از مدل SWAT رواناب را شبیه‌سازی نموده و نتایجی مشابه پژوهش انجام گرفته به دست آورده‌اند. همچنین چیو و همکاران[3] (٢٠١٨)؛ موبیالیوو و همکاران[4] (٢٠٢١) و لیو و همکاران[5] (٢٠٢٢) نیز با استفاده از مدلSIMHYD در بررسی سیل به نتایج خوبی دست یافتند. در این میان لازم به ذکر است که برای این پژوهش مدل SWAT به‌عنوان ابزاری قدرتمند، عملکرد نسبتاً بهتری در مقایسه با مدل توده‌ای SIMHYD در ارزیابی تولید رواناب ایجاد شده در این حوضه داشته است. ازجمله دلایل این برتری را می‌توان ماهیت نیمه‌توزیعی بودن آن و نیاز مدل SWAT به ورودی‌های بیش‌تری نسبت به مدل SIMHYD ذکر کرد که منجر به شبیه‌سازی رواناب روزانهٔ این حوضه

1 Sufiyan and Magaji
2 Phiri et al
3 Chiew et al
4 Mubialiwo et al
5 Liu et al

برخلاف مدلSIMHYD شده است و به‌عنوان عامل مهمی در ایجاد سیلاب‌های حوضه آبریز کرگانرود بشمار می‌رود. لذا به سبب این ماهیت یا عدم استفاده از مقادیر ثابت در ورودی‌ها، دقت مدل در شبیه‌سازی حوضه‌آبریز مطابق با واقعیت افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر بر اساس نتایج به دست آمده توانایی یک مدل در ارزیابی یک حوضه آبریز تنها در میزان پیچیدگی آن خلاصه نمی‌شود بلکه کیفیت و اعتبار داده‌های ورودی مدل در درجه اول حائز اهمیت است و خروجی‌های به دست آمده در هر دو مدل بیانگر این موضوع می‌باشند. چراکه حوضه‌های آبریز کشورهای دیگر به‌ویژه امریکا و استرالیا در حوضه‌های مشابه توسط همین مدل‌ها برآورد شده است و نتایج بسیار خوبی را مطابق با واقعیت شبیه‌سازی نموده‌اند.

کتابنامه

- آبابایی، بهنام؛ سهرابی، تیمور؛ ۱۳۸۸. ارزیابی عملکرد مدل SWAT در حوضه آبخیز زاینده‌رود. *مجله پـژوهش‌هـای حفاظت آب و خاک*. جلد ۱۶، شماره ۳، صص ۵۸-۴۱.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1388.16.3.3
- ابراهیمی، پیام؛ سلیمی کوچی، جمیله؛ محسنی ساروی، محسـن؛ ۱۳۹۷. واسـنجی و اعتبارسـنجی مـدلSWAT در شبیه‌سازی رواناب، مطالعه موردی: حوزه آبخیز نکا. *نشریه علمی–پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیـز*، جلـد ۱۰، شماره ۳، صص ۲۷۹-۲۶۶.
https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.117332
- بالویی، فاطمه؛ سلطانی کوپایی، سعید؛ توکلی، محسن؛ ۱۴۰۰. بررسی کارایی مدلSWAT درشـبیه‌سـازی روانـاب و رطوبت موجود در خاک در حوضه دویرج استان ایلام. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیـز*، سـال دوازدهـم، شـماره ۲۳، صص ۱۹۰-۱۸۰.
http://dorl.net/dor/20.1001.1.22516174.1400.12.23.17.2
- حبیبی، علیرضا؛ گودرزی، مسعود؛ ۱۳۹۷. کاربرد مدل نیمه‌توزیعی SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه حبلـه‌رود. *انجمن آبخیزداری ایران*، سال ۱۲، شماره ۴۳.
http://dorl.net/dor/20.1001.1.20089554.1397.12.43.7.0
- دستجردی، فریبا؛ آذرخشی، مریم؛ بشـیری، مهـدی؛ ۱۳۹۸. مقایسـه کـارایی مـدل‌هـای هیـدرولوژیکی (AWBM و SIMHYD) و شبکه عصبی (RBF و MLP) در شبیه‌سازی بارش–روانـاب. *مجلـه علـوم و مهندسـی آبخیـزداری ایران*، شماره ۴۵.
https://sid.ir/paper/957503/fa
- زارع گاریزی، آرش و طالبی، علی؛ ۱۳۹۵. شبیه‌سازی بیلان آب حوضه آبریـز بـا اسـتفاده از مـدل SWAT مطالعـه موردی: حوضه قره سو استان گلستان؛ *نشریه علوم مهندسی منابع آب*، شماره ۵۰، صص ۵۰-۳۷.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1395.9.30.4.9
- زمان‌پور، سجاد؛ شفاعی بجستان، محمود؛ خام‌چین‌مقدم، فرهـاد؛ زائـری، محمدرضـا؛ ۱۳۹۷. بررسـی تـأثیر حـذف پیچانرود بر الگوی جریان و رسوب رودخانه کارون با استفاده از نرم افزار CCHE2D. *مجله مهندسـی منـابع آب*، شماره ۳۸، صص ۱۰۶-۹۵.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1397.11.38.9.4

– طالبی، علی؛ سرایی، بهناز؛ مزیدی، احمد؛ پرویزی، سارا؛ ۱۳۹۹. اولویت‌بندی حوضه آبخیز سردآبرود از نظر سیل‌خیزی با استفاده از مدل SWAT، *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، شماره ۲۳، صص ۹۸–۸۵.
https://doi.org/10.22111/jneh.2019.29033.1500
– قضاوی، رضا؛ صیاد، دانیال؛ امیدوار، ابراهیم. ۱۳۹۹، بررسی کارایی مدل SWAT در برآورد دبی‌های روزانۀ حوضه‌های فاقد آمار با رویکرد منطقه‌بندی در مناطق خشک. *مجله هیدروژئومورفولوژی*، شماره ۲۵، صص ۱۸۲–۱۶۲.
https://doi.org/10.22034/hyd.2021.43934.1568
– کرمی، فریبا؛ بیاتی خطیبی، مریم؛ ۱۳۹۸. مدل ستازی فرستایش خاک و اولویت بندی تولید رسوب درحوضۀ سد ستارخان اهر با استفاده از مدل‌های MUSLE و SWAT. *نشریه هیدروژئومورفولوژی*، ۸۸۷– شمارۀ ۱۸، ص ۸.
https://civilica.com/doc/1592224
– گودرزی، محمدرضا؛ فاتحی‌فر، آتیه؛ ۱۳۹۸. پهنه‌بندی خطر سیلاب در اثر تغییرات اقلیمی تحت سناریو RCP 8.5 با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT در محیط GIS (حوضه آذرشهرچای). *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، شماره ۵۳.
https://www.doi.org/10.29252/jgs.19.53.99
– گلشن، محمد؛ کاویان، عطاءالله؛ روحانی، حامد؛ اسمعلی عوری، اباذر؛ ۱۳۹۴. شبیه‌سازی رواناب و بار رسوب حوضۀ آبخیز رودخانۀ هراز مازندران با بهره‌گیری از الگوی SWAT. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۷، شماره ۲، صص ۲۱۱–۱۹۷.
https://doi.org/10.22059/jphgr.2015.54459
– محضری، سمانه؛ کیانی، فرشاد؛ عظیمی، مژگان سادات؛ خرمالی، فرهاد؛ ۱۳۹۵. کاربرد مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب، رسوب و نیترات حوضه آبخیز گرگانرود ایران. *نشریه اکوپرشیا*، دوره ٤، شماره ۲، صص ۱۳۷۷–۱۳۵۹.
https://doi.org/10.18869/modares.Ecopersia.4.2.1359
– موزن زاده، روزبه؛ قهرمان، بیژن؛ ارشد، صالح و داوری، قهرمان؛ ۱۳۹۵. بهبود مدل سازی حوضه آبریز از طریق تجمیع مؤلفه‌های اصلی هیدرولوژیک در مدل SWAT، *نشریه تحقیقات منابع آب ایران*، سال دوازدهم، شماره ۳، صص ۷۹–۶۵.
https://sid.ir/paper/99929/fa
– نیکخو امیری، صدیقه؛ خوش‌روش، مجتبی؛ نوروزی ولاشدی، رضا؛ ۱۳۹۸، شبیه‌سازی سری زمانی جریان در محل خروجی سد شهید رجایی با استفاده از مدل SWAT، *مهندسی آبیاری و آب ایران*، شماره ۱، دوره ۱۰.
https://doi.org/10.22125/iwe.2019.95875

- Arnold, J.G., Sirivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, G.R., 1998. Large Area Hydrologic Modeling and Assesment part I: Model development. Journal Of the American Water Resource Association, 34(1): 73-89. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.
- Abbas pour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J. Zobrist, J. and Srinivasan, R., 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpin/ alpine Thur watershed using SWAT. Journal of Hydrology, 333: 413-430. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014.
- Ayele, G.T., Teshale, E.Z., Yu, B., Rutherfurd, I.D., and Jeong, J., 2017. Streamflow and Sediment Yield Prediction for Watershed Prioritization in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. Journal of Water, 3(510), 8-03.soc. 95 (8): 59-13. https://doi.org/10.3390/w9100782.

- Abu-Zreig, M., and Bani Hani, L., 2021. Assessment of the SWAT model in simulating watersheds in arid regions: Case study of the Yarmouk River Basin (Jordan). journal Of Open Geosciences, 13(1). https://doi.org/10.1515/geo-2020-0238.
- Boithias, L., Sauvage, S., Lenica, A., Roux, H., Abbaspour, K.c., Larnier, K., Dartus, D., and Sánchez-Pérez, J.M., 2017. Simulating Flash Floods at Hourly Time-Step Using the SWAT Model, Water, 9(929). https://doi.org/10.3390/w9120929.
- Basu, A.S., Gill, L.W., Pilla, F., and Basu, B., 2021. Assessment of Variations in Runoff Due to Landcover Changes Using the SWAT Model in an Urban River in Dublin, Ireland. Sustainability 2022, 14, 534. https://doi.org/10.3390/su14010534.
- Chen, R.S., Pi, L.C., and Hsieh, C.C., 2007. Application of parameters Optimization Method For Calibration Tank model. Journal Of the American Water Resources Association, 41(2), 389-402. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03743.
- Chen, X., Bing, Ch., and Hongjing, W., 2014. Parameter Uncertainty Analysis of Surface Flow and Sediment Yield in the Huolin Basin, China. Journal of Hydrology Engineering, 19(6), 1224-1236. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000909.
- Chiew, F.H.S., and Siriwardena, L., 2005. Estimation of SIMHYD Parameter Values for Application in Ungauged Catchments, edited, Melbourne, AUSTRALIA. p.pp. 2883-2889. http://www.mssanz.org.au/modsim05/papers/chiew_2.pdf.
- Chiew, F.H.S., Zheng, H., and Potter, N.J., 2018. Rainfall-Runoff Modelling Considerations to Predict Streamflow Characteristics in Ungauged Catchments and under Climate Change. journal of water, 10(10), 1319. https://doi.org/10.3390/w10101319.
- Dallison, R.J.H., Williams, A.P., Harris, I.M., and Patil, S.D., 2022. Modelling the impact of future climate change on streamflow and water quality in Wales, UK. Hydrological Sciences Journal, 67(6): 939–962. https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2044045.
- Escobar, E.C., Clanor, M.D.M., Bondad, R.G.M., Caburnay, J.M., Ventura, J.R.S., Dorado, A.A., Lu, M.M.D. and Glorioso, A.U., 2016. Rainfall-runoff Modeling of the Molawin Watershed of the Makiling Forest Reserve Using Five Lumped Conceptual Models. Philippine e-Journal for Applied Research and Development, 19-31. http://pejard.slu.edu.ph/vol.6/2016.03.31.pdf.
- Farhan, A.A. and Abed, B.Sh., 2021. Estimation of Surface Runoff to Bahr AL-Najaf. Journal of Engineering, 27(9), 51-63. http://dx.doi.org/10.31026/j.eng.2021.09.05.
- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., and Arnold, J.G., 2007. the Soil and Water Assessment Tools: historical development. application American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN, 50(4): 1211-1250. http://doi.org/10.13031/2013.23637.
- Hongyan, L., Yue, L., Haiqiong, L., Xiaojun, W., Shijie, W., and Ao, W., 2017. Adaptability Analysis of the Application of SIMHYD Model in the Songhua River Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 47(5), 1502-1510. http://dx.doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.201705204.
- Liu, X., Liu, L., Bai, P., Liang, K., and Liu, Ch., 2022. Comparison of flood simulation capabilities of a hydrologic model and a machine learning model. International Journal Of Hydrology, 7738. https://doi.org/10.1002/joc.7738.
- Moriasi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D. and Veith, T.L., 2007, Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. ASABE, 50(3), 885–900. http://doi.org/10.13031/2013.23153.
- Mubialiwo, A., Abebe, A., and Onyutha, Ch., 2021. Performance of rainfall–runoff models in reproducing hydrological extremes: a case of the River Malaba sub-catchment. sn applied sciences a springer nature journal, 3(515). https://doi.org/10.1007/s42452-021-04514-7.

- Neitsch S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. and King, K.W., 2009. Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation – version 2005, Texas. Agricultural Research Service, 494p.
- Peel, M.C., Mcmahon, T.A., Finlayson, B.L., and Watson, F.G.R., 2002. Implicatins of the relationship between catchment vegetation type and the variability of annual runoff. Hydrological processes, 16(15), 2995-3002. http://dx.doi.org/10.1002/hyp.1084.
- Podger, Geoff., 2003, Rainfall Runoff Library Manual, Version 1.0. CRC for Catchment Hydrology, 90. https://toolkit.ewater.org.au/Tools/RRL/documentation.
- Phiri, W.K., Vanzo, D., Banda, K., Nyirenda, E., and Nyambe, I.A., 2021. A pseudo-reservoir concept in SWAT model for the simulation of an alluvial floodplain in a complex tropical river system. Journal of Hydrology: Regional Studies, 33, 100770. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100770.
- Sufiyan, I., and Magaji, J.I., 2019. Modeling Flood Hazard Using SWAT And 3D Analysis In TERENGGANU Watershed. Journal Clean Was, 2(2):19-24. http://dx.doi.org/10.26480/jcleanwas.02.2018.19.24.
- Shokouhifar, Y., Zarei, H., Akhondali, A. M., & Khoramian, A., 2021. Assessment of effects of changes of land-use on the water balance components using SWAT (Case study: Doroudzan dam basin). Irrigation Sciences and Engineering. https://doi.org/10.22055/jise.2021.36431.1952.
- Silva Dias, R.L., Ferreira, R.G., Castro, J.D.S., Santos, V.J.D., Calijuri, M.L. and Dasilva, D.D., 2021. Performance of hydrological models in fluvial flow simulation. Journal of Ecological Informatics, 66, 101453. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101453.
- Yu, Dan; Xie, Ping; Dong, Xiaohua; et al., 2018. Improvement of the SWAT model for event-based flood simulation on a sub-daily timescale. Hydrology and Earth System Sciences, 22(9), 5001-5019. https://doi.org/10.5194/hess-22-5001-2018.